

自升式钻井平台穿刺分析

戴兵¹, 段梦兰¹, 宋林松², 董楠¹

1. 中国石油大学(北京)海洋油气研究中心, 北京 102249
2. 中海油田服务股份有限公司, 北京 101149

摘要 自升式钻井平台是近海石油和边际油田开发的重要设备。据统计, 穿刺事故占自升式钻井平台总事故的比例超过了 50%, 造成平台严重损坏和人员伤亡。以 Arab drill 19 自升式钻井平台和中国某自升式钻井平台的穿刺事故为例, 分析穿刺事故发生的原因, 说明穿刺事故的危害。采用投影面积法, 分析了中国某自升式钻井平台在渤海某井位发生穿刺事故的可能性, 结果表明, 该平台存在较大的穿刺风险, 并预测了穿刺后的插桩深度。对比平台实际插桩深度, 预测结果存在较大误差。结合穿刺研究的最新成果, 分析两者存在误差的原因: 实际插桩过程中, 桩靴底部将形成砂土塞, 该砂土塞会极大地提高土体的极限承载能力, 导致实际插桩深度比预测插桩深度浅。

关键词 自升式钻井平台; 穿刺; 投影面积法; 砂土塞

中图分类号 U655.55

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)17-0063-04

Investigation of the Punch-through in Jack-up Rigs

DAI Bing¹, DUAN Menglan¹, SONG Linsong², DONG Nan¹

1. Offshore Oil & Gas Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. China Oil Services Limited, Beijing 101149, China

Abstract Jack-up rigs are widely used in offshore oil and marginal oil field development. According to statistics, punch-through accidents account for more than 50% of jack-up rigs' accidents, leading often to serious damages of the jack-up rigs and casualties. Taking the Arab drill 19 jack-up and a Chinese jack-up as examples, the causes of the accidents and the seriousness of consequences are analyzed. The projected area method is used to study the possibility of punch-through for a domestic jack-up at a well site in Bohai Bay. It is found that the punch-through risk at the well site is high. The calculated penetration depth does not agree very well with the actual operational record, with a great error, which is analyzed in this paper based on new research results of punch-through. It is shown that during punch-through in a jack-up rig, a sand plug will be formed under the spudcan of the jack-up rig, which increases the ultimate bearing capacity of soil, and reduces the actual depth.

Keywords jack-up rig; punch-through; projected area method; sand plug

0 引言

自升式钻井平台移动灵活、稳定性好, 可以进行钻井、修井、试油、试采等作业; 相比钻井船、半潜式钻井平台, 日租金较低。因此, 自升式钻井平台在海洋石油开发中得到了广泛的应用。表 1 为全球现有海上钻井装置数量统计^[1], 自升式钻井平台所占比例超过了 40%。中国三大石油公司的海洋钻井

公司也拥有数量可观的自升式钻井平台: 中海油田服务股份有限公司 20 艘, 中国石油集团海洋工程公司 6 艘, 胜利油田海洋钻井公司 5 艘。

因此, 研究自升式钻井平台作业过程中的相关问题, 对保证自升式钻井平台的作业安全, 促进中国海洋石油的开发, 具有重要的社会意义和经济价值。

收稿日期: 2010-05-17; 修回日期: 2010-08-10

作者简介: 戴兵, 博士研究生, 研究方向为海洋工程, 电子信箱: daibingbox@yahoo.com.cn; 段梦兰(通信作者), 教授, 研究方向为海洋工程、结构工程、固体力学, 电子信箱: mlduan@cup.edu.cn

表 1 全球现有海上钻井装置数量统计
Table 1 The existing offshore drilling units in the world

类型	数量/台
钻井驳船	48
钻井船	84
内陆驳船	73
自升式钻井平台	506
平台钻机	251
半潜式钻井平台	223
坐底式钻井平台	6
供应船	34

1 穿刺定义

自升式钻井平台作业区域地质条件复杂。当桩靴基础位于上硬下软的层状地层时,自升式钻井平台存在穿刺的风险,严重影响着平台的作业安全。

图 1 给出了自升式钻井平台历年事故类型统计^[2],穿刺事故占各类事故总和的 53%。虽然不少学者对自升式钻井平台的穿刺进行了研究^[3-7],但没有系统提出穿刺的概念。2002 年,Osborne 和 Paisley^[8]在调研并分析大量穿刺事故的基础上,定义了自升式钻井平台的穿刺:自升式钻井平台在作业期间,基础发生未预料到的快速沉降,从而导致严重损失的事故。根据损失程度,穿刺事故可以分为两类:①“穿刺失效”,即自升式钻井平台的钻机或其可操作性受到严重损失;②“不可控制的插桩”,即自升式钻井平台受到的损害较小,对操作性影响不大。根据作业经验,穿刺事故主要发生在自升式钻井平台升船、预压载或者风暴期间^[9]。

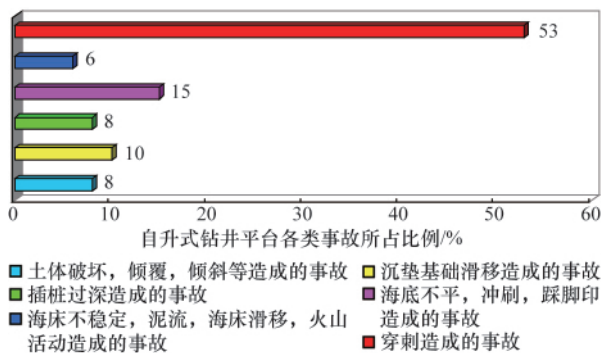


图 1 自升式钻井平台各类事故类型统计
Fig. 1 Different types of accidents in jack-up rigs

2 穿刺事故分析

穿刺事故对自升式钻井平台危害极大,轻者导致平台结构损坏,影响正常作业,耗费大量维修费用;重者导致平台倾覆,人员伤亡,造成重大事故。据统计,最近几年,每年发生 1~2 起自升式钻井平台穿刺事故,每次事故造成的经济损失为 100 万~1000 万美元^[10]。

2.1 Arab drill 19 自升式钻井平台穿刺事故

2002 年 9 月,阿拉伯钻井公司的 Arab drill 19 自升式钻井平台在沙特阿拉伯 Khafji 油田作业时发生穿刺,导致一根桩腿发生屈曲。钻井平台倒塌在作业的生产平台上,使其采油树发生剪切破坏,引发井喷和火灾,最终导致两平台沉没^[11]。

2.2 中国某自升式钻井平台穿刺事故

2009 年 5 月,中国某自升式钻井平台在南海海域准备进行预探井作业。当船体离开水面 2m,对 1 号桩预压载时,由于海底地质原因,1 号桩发生穿刺,导致船舶倾斜 6.2°并继续下沉。幸好操作人员采取了适当措施,强行降船,控制住了险情。该事故虽未造成人员伤亡,但致使 2 号桩和 3 号桩 106.4m 处 4 根斜撑管、2 根跨距间撑管发生变形(图 2),3 根桩的所有齿条尖部均磨损,齿条受损的长度达 20m(图 3)。

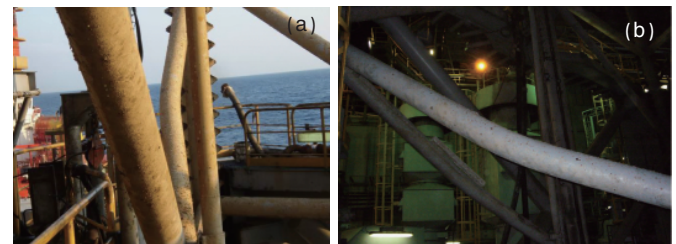


图 2 斜撑弯曲变形
Fig. 2 Deformation of oblique braces



图 3 齿条磨损
Fig. 3 Wear and damage in racks

为了避免自升式钻井平台发生穿刺,需要对平台在作业井位的穿刺可能性进行分析,以保证平台的作业安全。

3 穿刺可能性分析

目前,中国采用《海洋井场调查规范》^[12]分析自升式钻井平台在作业井位的穿刺可能性。该规范与 SNAME(The Society of Naval Architects and Marine Engineers)推荐的自升式钻井平台穿刺分析方法原理相同^[13],均采用投影面积法(图 4)。

投影面积法原理:当自升式钻井平台桩靴所处地层上部是较薄的硬砂层、下部是软弱的黏土层时,可以将作用在上部砂土的基础载荷扩展通过硬砂层等效到下部黏土层的顶部;扩展系数为水平距离:垂直距离=1:n,SNAME 建议 n 值取 3~5,《海洋井场调查规范》选取 n=3。《海洋井场调查规范》中穿刺分析的单位极限承压力计算式为

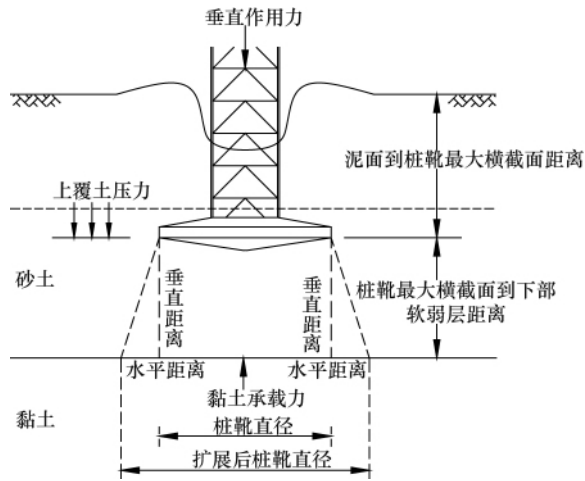


图 4 投影面积法模型

Fig. 4 Model of the projected area method

$$q_n = 6S_u \left(1 + 0.2 \frac{D+H}{B + \frac{2}{3}H} \right) \left(1 + \frac{2H}{3B} \right)^2 \leq q_{n(\text{硬层})} \quad (1)$$

其中, q_n 为单位极限承压力, kN/m^2 ; S_u 为基础底面以下 $B/2$ 深度内的平均不排水抗剪强度, kN/m^2 ; D 为桩靴入泥深度, m ; H 为基础最大横截面以下硬土层的厚度, m ; B 为桩靴基础直径, m ; $q_{n(\text{硬层})}$ 为硬土层被假设为无限厚时的单位极限承压力, kN/m^2 。

本文使用投影面积法分析中国某自升式钻井平台在渤海一井位的穿刺可能性; 如果发生穿刺, 将预测穿刺后桩靴的插桩深度。该平台桩靴形状为立方体, 高 6.5m , 长 6.3m , 宽 6.3m , 最大横截面面积为 39.69m^2 , 桩靴体积为 258m^3 。

表 2 为渤海某井位的地质参数。在 35.3MN 预压载荷作用下, 使用投影面积法得到土体的极限承载力曲线 (图 5)。根据《海洋井场调查规范》, 平台的相对穿刺安全系数为 1.06 , 因此自升式钻井平台在该井位的穿刺可能性极大。由土体极限承载力曲线可知, 如果发生穿刺, 桩靴将穿透深度为 $12.7\sim 15.1\text{m}$ 的密实的黏质粉砂和 $15.1\sim 17.5\text{m}$ 的硬的粉质黏土, 最终持力层为深度 17.5m 处密实的粉质细砂, 穿刺深度将达 4.8m 。

表 2 井位参数

Table 2 Design parameters at well site

层号	土质描述	深度/ m	水下容重 $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	设计抗剪 强度/ kPa	粒状土设计参数 $\Phi/(\circ)$	承载力系数	
						N_q	N_r
1	非常软~软的黏土	0.0~6.8	6.4	4.0~14.0			
2	中密实的粉砂	6.8~9.1	7.9		20	6.4	5.4
3	软~稍硬的粉质黏土	9.1~10.4	7.7	15.0~32.0			
4	硬的黏土	10.4~12.7	8.3	50.0			
5	密实的黏质粉砂	12.7~15.1	8.7		25	10.7	10.9
6	硬的粉质黏土	15.1~17.5	9.2	65.0			
7	密实的粉质细砂	17.5~20.3	8.5		30	18.4	22.4
8	密实的细砂	20.3~21.9	8.9		35	33.3	48.0
9	稍硬~非常硬的粉质黏土	21.9~23.5	8.3	45.0			
		23.5~25.0	8.5	100.0			
10	密实的砂质粉砂	25.0~29.4	8.9		30	18.4	22.4
11	密实的粉质细砂	29.4~31.6	9.0		35	33.3	48.0
12	稍硬~硬的黏土	31.6~40.5	8.0	50.0			

4 预测插桩深度与实际插桩深度误差分析

2006年2月, 自升式钻井平台在该井位进行了插桩作业。根据平台拖行日志, 1、2、3号桩的插桩深度分别为 13.7 、 14.2 、 14.2m 。

对比实际插桩深度和预测插桩深度, 两者存在较大的误差。实际插桩中, 桩靴到达的土层是深度为 $12.7\sim 15.1\text{m}$ 处的密实的黏质粉砂, 而不是投影面积法预测的桩靴将穿透深度为 $12.7\sim 15.1\text{m}$ 的密实黏质粉砂以及深度为 $15.1\sim 17.5\text{m}$ 的硬粉质黏土, 到达 17.5m 处的密实粉质细砂。

分析两者产生较大误差的原因是: 插桩过程中, 深度为 $12.7\sim 15.1\text{m}$ 的密实黏质粉砂受到剪切破坏后, 桩靴下部将会形成砂土塞^[4](图 6)。砂土塞的厚度受预压载荷、土体性质、桩靴直径等因素的影响^[15-16], 并且该砂土塞可以作为桩靴的一部分。

随着桩靴插桩深度的增加, 预压载荷通过砂土塞作用在硬的粉质黏土, 导致黏土被压实, 极限承载力增大, 加上砂土塞周围摩擦力的影响^[7], 发生剪切破坏后, 桩靴下部土体的极限承载力大大提高。因此, 实际插桩深度比预测插桩深度浅。



图5 土体极限承载力曲线
Fig. 5 Bearing capacity profile

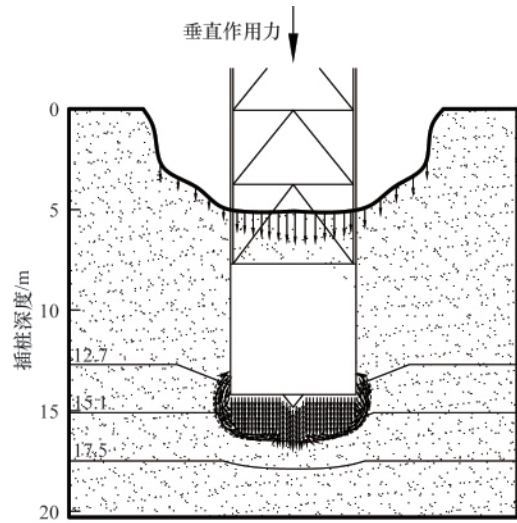


图6 自升式钻井平台插桩后形成的砂土塞
Fig. 6 Sand plug under the jack-up rig spudcan when it is penetrated

5 结论

投影面积法能合理评估自升式钻井平台穿刺开始时土体的极限承载能力,但没有考虑硬砂层破坏后土体形态的变化以及这种变化对土体极限承载力的影响。为了评估自升式钻井平台在具体井位的穿刺可能性,需要将投影面积法和硬砂层剪切破坏后桩靴下部土体的变化结合起来,分析土体的极限承载能力,才能得到准确结果。

参考文献 (References)

[1] Riglogix. Rig report: Offshore rig fleet by rig type [RB/OL]. http://www.rigzone.com/data/rig_report.asp?rpt=type.

[2] Health & Safety Executive. Guidelines for jack-up rigs with particular reference to foundation integrity [R/OL]. 2004, <http://www.hse.gov.uk/research/rpdf/tr289.pdf>.

[3] Ueda Y, Rashed S M H, Ishihama T, et al. Ultimate strength of jack-up rigs in survival and punch-through conditions [J]. *Transactions of JWRI*, 1987, 16(2): 393-403.

[4] Fujii T, Kobayashi T, Tagaya K. Punch-through Encountered in India and Indonesia [C]//Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1989: 6124-MS.

[5] Watanabe Y. Development and field tests on prototype of leg penetration monitor system to avoid the punch-through accidents of jackup rigs[C]//Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1990: 6469-MS.

[6] Rapoport V, Devoy S D, Alford J, et al. Soil-structure interaction during preloading of jackup MODU's in different soil conditions[C]//Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1994: 7531-MS.

[7] Maung U M, Ahmad C K M. Swiss cheesing to bring in a jack-up rig at aniding location [C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, Kuala Lumpur, 2000: 62755-MS.

[8] Osborne J J, Paisley M. S E Asia jack-up punch-throughs: The way forward [C]//Offshore Site Investigation and Geotechnics Diversity and Sustainability, Proceedings of an International Conference. London: The Society for Underwater Technology, 2002: OSIG-02-301.

[9] Baglioni V P, Chow G S, Endley N C. Jack-up rig foundation stability in stratified soil profiles [C]//Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1982: 4409-MS.

[10] Hossain M S, Cassidy M J, Daley D, et al. Experimental investigation of perforation drilling in stiff-over-soft clay [J]. *Applied Ocean Research*, 2010, 32(1): 113-123.

[11] Usumacinta[EB/OL]. 2007, <http://www.oilrigdisasters.co.uk/>.

[12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. SY/T 6707-2008 海洋井场调查规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008. National Development and Reform Commission. SY/T 6707-2008 Specification for marine well site survey[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.

[13] Technical and Research Bulletin 5-5A, Guidelines for site specific assessment of mobile jack-up units [S]. New Jersey: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2007: 108-110.

[14] Teh K L, Leung C F, Chow Y K, et al. Prediction of punch-through for spudcan penetration in sand overlying clay [C]//Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 2009: 20060-MS.

[15] Teh K L, Leung C F, Chow Y K, et al. Analysis of spudcan installation through loose sand into clay [C]//1st Jack-up Asia Conference and Exhibition, Singapore, 2006.

[16] Teh K L. Punch-through of spudcan foundation in sand overlying clay [D]. Singapore: National University of Singapore, 2007.

[17] Craig W H, Chua K. Deep penetration of spudcan foundation on sand and clay[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(4): 541-556.

(责任编辑 刘志远)